

7. MAA PÖÖRLEVA TAUSTSÜSTEEMINA

7.1. Rotor

Küsimus. Ketas pöörleb z -telje ümber, xy -tasapinnas, ülalt vaadates vastupäeva, nurkkiirusega ω . Kui suur on kettal asuva mingi punkti *rootor*?

curl, rotor; помп, вухпб – rootor, keeris, pööris; vektorvälja vektoriline tuletisfunktsioon, kirjeldab välja pöörlevat liikumist; tavaliselt arvutatakse kiirusväljast;

the **curl** is a vector operator that describes the rotation of a 3-dimensional vector field;

at every point in the field, the **curl** of that point is represented by a **vector**;

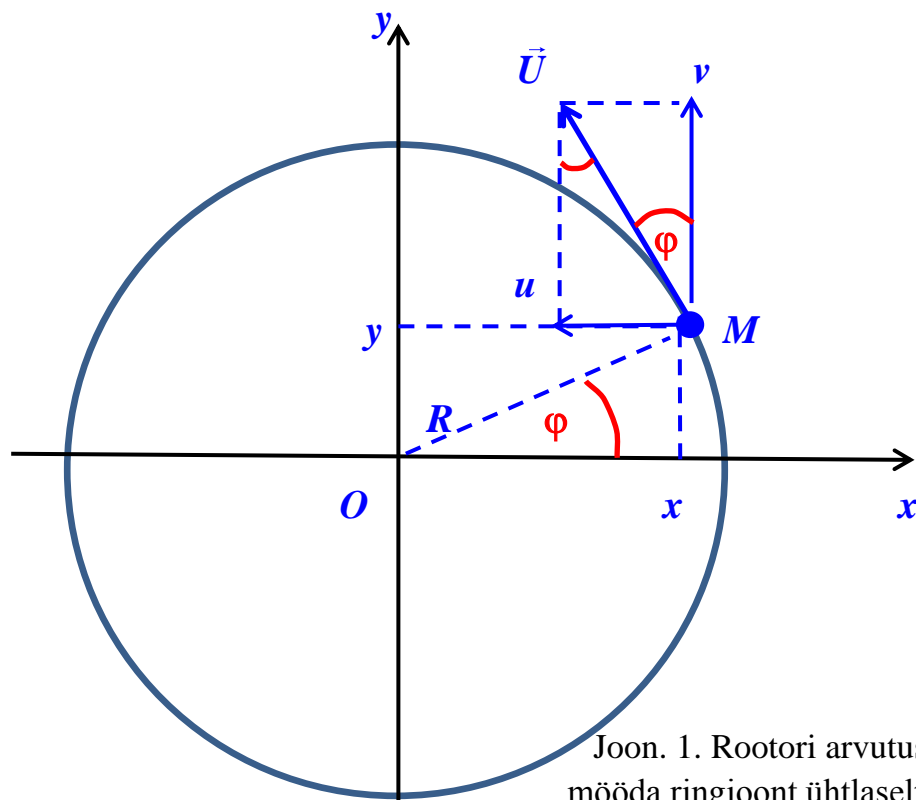
the attributes of this vector (length and direction) characterize the rotation at that point

Wikipedia

Kui Te ei ole seda vektorfunktsiooni õppinud, siis võib see mõiste tunduda ebamäärasena. Selgitame, lähtume ringjoonel tiirleva punkti $M(x, y)$ kiirusvektorist, $\vec{U} = (u, v, w)$.

Rootori definitsioon:

$$\text{rot } \vec{U} = \text{curl } \vec{U} = \nabla \times \vec{U}.$$



Joon. 1. Rootori arvutus mööda ringjoont ühtlaselt liikuva punkti korral.

Punkti M joonkiiruse vektori \vec{U} pikkus (moodul):

$$|\vec{U}| = \frac{2\pi R}{T} = \omega R.$$

Punktis M on kiirusvektori $\vec{U} = (u, v, w)$ komponendid: x -teljeline kiirus, u ,

y -teljeline kiirus, v ,

z -teljeline kiirus, $w = 0$.

Avaldame kiirusvektori x -teljelise komponendi, u :

$$u = -|\vec{U}| \underbrace{\sin \varphi}_{\substack{\text{määrab kolmnurgast } O x M, \\ \text{punkti } M(x, y) \text{ koordinaatide ja raadiuse } R \text{ järgi}}} = -\omega R \cdot \frac{y}{R} = \underline{\underline{-\omega y}},$$

määrab kolmnurgast $O x M$, punkti $M(x, y)$ koordinaatide ja raadiuse R järgi

Avaldame kiirusvektori y -teljelise komponendi, v :

$$v = |\vec{U}| \cos \varphi = \omega R \cdot \frac{x}{R} = \underline{\underline{\omega x}}.$$

Definitsiooni järgi on rootor kahe vektori vektorkorrutis:

$$\text{rot } \vec{U} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ -\omega y & \omega x & 0 \end{vmatrix} = \omega \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ -y & x & 0 \end{vmatrix},$$

vastavalt rootori x -, y - ja z -komponendid (alamdeterminantide reegel):

$$\text{rot}_x \vec{U} = \omega \vec{i} \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ x & 0 \end{vmatrix} = \omega \vec{i} \left[\frac{\partial}{\partial y} 0 - \frac{\partial}{\partial z} x \right] = 0,$$

$$\text{rot}_y \vec{U} = -\omega \vec{j} \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} \\ -y & 0 \end{vmatrix} = -\omega \vec{j} \left[\frac{\partial}{\partial x} 0 - \frac{\partial}{\partial z} (-y) \right] = 0,$$

$$\text{rot}_z \vec{U} = \omega \vec{k} \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \\ -y & x \end{vmatrix} = \omega \vec{k} \left[\frac{\partial}{\partial x} x - \frac{\partial}{\partial y} (-y) \right] = \dots\dots\dots$$

Seega jääb antud juhul järele ainult rootori z -komponent, tavaliselt jäetakse koordinaattelgede ühikvektorid kirjutamata, niisiis, jättes vektori \vec{k} kirjutamata, on rootori z -komponent (kirjutage ise valem lõpuni):

$$\text{rot}_z \vec{U} = \dots\dots\dots$$

NB! Eesti Entsüklopeedias (EE-1995, nr 8, lk 202) on märksõnas 'rootor' viga:

$$\text{rot}_z \vec{U} = \vec{\omega},$$

nagu nägite esitatud tõestuses, on õige valem pisut teistsugune...

7.2. Baer-Babinet' seadus

Karl Ernst von Baer

28. veebr 1792, Järvamaa, Piibe mõis – 28. nov 1876, Tartu.

Mitmekülgne, laia haardega loodusteadlane, kirjeldava ja võrdleva embrüoloogia rajaja.

Õppis 1810–1814 Tartu Ülikoolis arstiteadust. Oli tuntud oma sarkastiliste ja halvustavate ütleliste poolest, ka eestlaste rämpse eluviisi suhtes. Aastal 1812, kui Riias möllas tüüfus, reageeris ka Baer võimude üleskutsele ja tõttas epideemiat likvideerima, haigeid ravima ja kogemusi omandama. Õnnetuseks nakatus ta ka ise. Enda sõnul pääses ta kõige hullemast tänu nooruslikule tugevusele ja ... puudulikule arstiabile.

Aastast 1817 Königsbergis, kus sai zooloogia ja anatoomia professoriks.

1828. aastast Peterburi TA akadeemik, 1834–1862 Peterburis.

Alates 1867 uuesti Tartus, 1869–1876 Loodusuurijate Seltsi esimees.

Uuris kalade, kahepaiksete, roomajate, imetajate ning eriti põhjalikult kana **embrüonaalset arengut**.

1826. aastal avastas **imetajate, sh inimese munaraku**. Tõestas, et loomade looteil avalduvad kõigepealt hõimkonna, seejärel klassi, seltsi, sugukonna, perekonna, liigi, ning kõige lõpuks isendi tunnused.

Peale meditsiini töötas **geograafia, antropoloogia, etnograafia ja ihtüoloogia alal**. Algas liivlaste uurimise.

1856. aastal avastas jõgede kallaste uhtumise seaduspärasuse (Baeri seadus, algselt antud vaid **meridiaani sihis** voolavate jõgede suhtes).

Seadust täpsustas J. Babinet 1859. aastal (Baer-Babinet' seadus):

põhjapoolkera jõed uhuvad rohkem paremat ja lõunapoolkera jõed vasakut kallast (jõgi ei pea olema meridionaalselt orienteeritud).

Seadus selgitab, miks on põhjapoolkeral jõgede paremad kaldad järsuks uuristatud, vasakud kaldad aga lauged. Lõunapoolkeral vastupidi. Ekvaatoril efekt puudub (muudab märki).

Varia. Lisaks Eestist saadava hariduse kriitikale andis K. E. v. Baer hävitava hinnangu ka eestlaste elukommetele. *Pärast sügistöid polegi eestlastel miskit muud teha, kui pimedatel talveõhtudel end kurguauguni rasvast sealihaga, mooritud hapukapsaid, musta leiba ning muud raskesti seeditavat kraami täis viitsutada, peale üliohtu pöletatud viina ja kanget koduõlut juua, pärast seda ühetoonilist laulujoru venitada ja veidramoelist jõnktantsu tammuda.*

Lembitu Twerdianski, Kullamaa Valla Ajaleht.

<http://maaleht.delfi.ee/news/eesti/lu/arhiiv/eestlaste-olemus-karl-ernst-von-baeri-jargi-aplad-mustuselembed-asjade-kasutamises-nomedad-ja-lobusad-void-purjus-olekus?id=70451475>

Gustave-Gaspard Coriolis (1792–1843). Õppis teedeinseneriks. Uuringud teoreetilises ja rakendusmehhaanikast, eriti suhtelistest liikumistest, näiteks piljardikuulide omast pöörleval alusel. **Võttis teoreetilises mehaanikas kasutusele terminid 'töö' ja 'kineetiline energia'.** Hilisemalt, ballistika, dünaamiline meteoroloogia ja okeanoloogia tuginevad nn Coriolise efektile.

Maaga seotud, pöörlevas (mitteinertsiaalses, kiirendusega liikuv) koordinaadistikus põhjustab jõgede, merehoovuste, tuule ja üldiselt iga liikuva objekti kõrvalekaldumist oma algsest suunast (põhjapoolkeral paremale) fiktiivne (inertsiaalne) nn **Coriolise jõud**, mis tekitab liikumisele ristisuunalise kiirenduse, põhjapoolkeral **90° paremale** liikumissuunast.

Demo1: teraskuuli veeremine pöörleval alusel, toa seinte suhtes liigub kuul otse.

7.3. Coriolise kiirendus

Saab tõestada, et pöörlevas taustsüsteemis mõjub kehale nn Coriolise (< korioliisi > ??) kiirendus \vec{c} , mis avaldub taustsüsteemi (planeet Maa) pöörlemise nurkkiiruse $\vec{\omega}$, ja keha kiiruse \vec{V} kaudu järgmiselt:

$$\vec{c} = -2(\vec{\omega} \times \vec{V}) = 2(\vec{V} \times \vec{\omega}), \quad (1)$$

Kui liikumine on horisontaaltasapinnas, siis Coriolise jõud kallutab põhjapoolkeral liikumist kiiruse suunast paremale. Leiame selle kiirenduse suuruse valemi (1) alusel. Keha kiirusvektori \vec{V} ja maakera nurkkiirusvektori $\vec{\omega}$ vektorkorrutise moodul (vektori pikkus)

$$|\vec{V} \times \vec{\omega}| = V\omega \sin\varphi, \quad (2)$$

siis Coriolise kiirenduse suurus kui kahekordne viimasest vektorkorrutisest

$$c = |\vec{c}| = 2 V \omega \sin\varphi = V \underbrace{2 \omega \sin\varphi}_f = V f, \quad (3)$$

kus φ on asukoha geograafiline laiuskraad ja f Coriolise parameeter (f – frequency):

$$f = 2 \omega \sin\varphi - \text{Coriolise parameeter, globaalne keeriseliisus.} \quad (4)$$

Coriolise parameeter on sisse toodud valemite lühendamiseks ning on laialdaselt kasutusel atmosfääris ja meres toimuvate liikumiste kirjeldamisel.

Kui atmosfääri või mere liikumisvalemis tuleb teha hinnangulisi arvutusi, siis tehakse seda nn “keskmistel laiustel”, st $\varphi = 45^\circ$. Arvutame selle laiuskraadi Coriolise parameetri, f_{45} , kasutame eespool arvutatud Maa pöörlemise nurkkiirust ω (korrektsema ehk täheööpäeva järgi):

$$\omega = 7.29 \cdot 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)},$$

ja paigutame selle valemisse (5):

$$f_{45} = 2 \omega \sin 45^\circ = 2 \cdot 7.29 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1} \cdot 0.707 = 1.03 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1} \approx \underline{\underline{10^{-4} \text{ s}^{-1}}}.$$

Coriolise parameetri väärtust f_{45} kasutatakse arvutustes, kus on vaja hinnata Coriolise jõu ja kiirenduse väärtusi, kuid laiuskraad on konkretiseerimata. Kui laiuskraad on konkretiliseeritud, saab parameetri f täpselt arvutada.

Ettekujutuse saamiseks Coriolise parameetri muutumispäiridest, esitame järgnevas tabelis selle parameetri väärtused mõnede põhjapoolkera laiuskraadide jaoks.

Tabel 1. Coriolise parameeter põhjapoolkeral

Laiuskraad φ	Coriolise parameeter $f = 2\omega \sin\varphi$
Ekvaator, 0°	0.000
10°	$0.253 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$
30°	$0.729 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$
Keskmised laiused, 45°	$1.03 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$
60°	$1.26 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$
70°	$1.37 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$
Põhjapoolus, 90°	$1.46 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

Vastavate lõunapoolkera laiuskraadide jaoks on Coriolise parameeter negatiivne.

Kõrvelekalde arvutusnäide

Korvpallur sooritab Tallinnas toimuvatel võistlustel ülikaugviske (**20 m**). Hinnata, kui palju kaldub pall kõrvale Coriolise jõu mõjul.

Algandmed

Laiuskraad, võtame $\varphi = 60^\circ$ (kuigi, $\varphi_{\text{Tallinn}} = 59^\circ 26'$, $\varphi_{\text{Tartu}} = 58^\circ 23'$).

Palli horisontaalliikumise kiirus (hinnanguliselt): $V = 72 \text{ km/h}$.

Korvpalluri kaugus korvirõngast: $s = 20 \text{ m}$.

Lahendus

Coriolise kiirenduse arvutusvalem

$$c = Vf.$$

Teisendame palli kiiruse SI-süsteemi, palli kiirus V :

$$V = \frac{72 \text{ km}}{\text{h}} = \frac{72000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Pallile mõjuv Coriolise kiirendus (kasutame f_{60} väärtust $f_{60} = 1.26 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$):

$$c = Vf_{60} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1.26 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1} = 25.2 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-2} = 2.52 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-2} = 2.52 \text{ mm s}^{-2}.$$

Palli õhusoleku aeg

$$t = \frac{\text{teepikkus}}{\text{kiirus}} = \frac{s}{V} = \frac{20 \text{ m}}{20 \text{ m/s}} = 1 \text{ s}.$$

Coriolise kiirenduse põhjustatud otsitav kõrvalekalle

$$x = \frac{ct^2}{2} = \frac{2.52 \text{ mm s}^{-2} \cdot 1 \text{ s}^2}{2} = 1.26 \text{ mm} \approx 1.3 \text{ mm}.$$

Ilmselt on kõrvalekalle nii väike, et korvpalli mängutehnikas seda arvestama ei pea. Kuid Coriolise kiirendust on vaja arvestada suurema ulatusega (mastaabiga) liikumistel, näiteks merejää triivimisel, õhu- ja veemasside liikumistel, kaugtulistamistel jne.

NB! Eesti Entsüklopeedias (nii vanas kui uues) on märksõnas *merehoovus* põhimõtteline viga: “põhjapoolkeral merehoovused kalduvad paremale ~~ekvaatorilt vaadates~~”. Õige oleks:

”...kalduvad paremale *oma liikumise suunast*”

Ülesanne 7.1 (tennispalli ülesanne). Tennispalli horisontaalkiirus on **216 km/h**, lennukaugus **20 m**. Kui palju kaldub pall kõrvale Coriolise jõu tõttu? Laiuskraadiks võtta **60°**. Järeldus kiiruse ja kõrvalekalde (-nihke) omavahelisest seosest (etteantud teepikkuse korral)??

Ülesanne 7.2 (hokilitri ülesanded). Laiuskraadil 60° asuval horisontaalsel hõõrdevabal jääpinnal lükatakse aeglaselt liikuma hokilitter.

Küsimus 1. Milline peaks olema laiuskraadil 60° hõõrdevabalt libiseva **hokilitri kiirus, et litter pöörduks, ringjoonelisel trajektooriga, $R = 10 \text{ m}$** , Coriolise jõu tõttu **liikumise alguspunkti tagasi?** Võrdluseks, hokiväljaku laius on **26 m**.

Küsimus 2. Sellise raadiuse korral, **$R = 10 \text{ m}$** , laiuskraadil 60° , palju kulub hokilitril aega täisringi tegemiseks?

Küsimus 3. Milline oleks hõõrdevabalt libiseva hokilitri **trajektoori raadius R** , laiuskraadil $\varphi = 60^\circ$, kui hokilitri **algkiirus** oleks, **$V = 108 \text{ km/h}$** ?

7.4. Passaattuuled

passaat (< holl k) – aastaringselt **25.–30. laiuskraadilt ekvaatori poole** puhuv püsiva suuna ja kiirusega niiske jahe tuul, põhjapoolkera passaadid on suunatud **edelasse**, lõunapoolkera passaadid **loodesse**; tugev komponent läände

trade winds – these steady winds are named from the term *to blow trade*, which means to blow in a regular course; if Earth did not rotate, these winds would follow a simple north-south movement

trade (< alam-sks. k) – rada, tee

Ekvaatori juures tõuseb soojenenud õhk üles ja valgub mitme kilomeetri kõrguses pooluste poole ning laskub uuesti nn *hobulaiustel*, ca **30°** juures. Atmosfääri alumises kihis asendab ülesliikunud õhku jahedam õhk kõrgematelt laiustelt. Coriolise jõu mõjul kaldub see jahedam õhk põhjapoolkeral paremale, lõunapoolkeral vasakule põhjustades püsiva suunaga nn *passaattuuled*. Põhjapoolkera passaadid puhuvad **kirdest**, lõunapoolkera passaadid **kagust**.

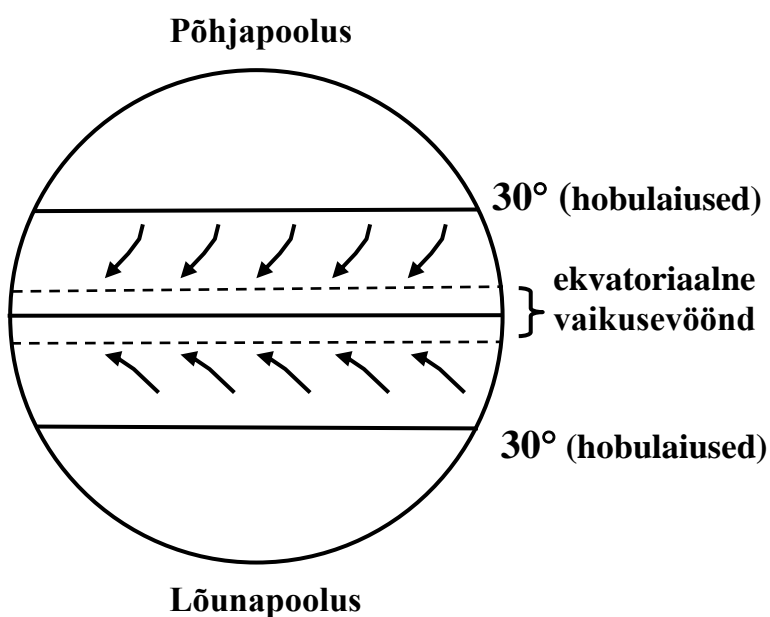
Kui maakera ei pöörleks, puhuksid passaadid põhja-lõunasihis, suunaga ekvaatori poole.

Passaatidest kõrgemal puhuvad vastassuunalised tuuled – *antipassaadid*.

Passaatide **vertikaalne ulatus** on suurim ekvaatori lähedal: **2–15 km**.

Passaattuulte keskmine kiirus aluspinna lähedal on **5–6 m/s**. Passaattuultel oli suur majanduslik tähtsus purjelaevade ajastul.

Põhja- ja lõunapoolkera passaate lahutab ekvaatori juures alumistes õhukihtides vaikusevöönd (ingl k *doldrums*), kus Coriolise kiirenduse mõju on tühine. Soe, niiske õhk tõuseb ja kondenseerub pilvedeks. Õhurõhk on vahetult ekvaatori ümbruses madal (soe niiske õhk). Tuulevaikus võib kesta nädalaid.



Joon. 2. Passaattuulte skeem.

doldrums – ingl k: • rõhutatud meeleolu (*to be in the doldrums*)

• ekvatoriaalne tuulevaikuse tsoon

Kuid tõusev õhk ekvaatori lähedal põhjustab väga kõrgele ulatuvat pilvisust, sademeid, turbulentsi, äikest, troopilisi torme, mis võivad ootamatult välja vahetada tuulevaikuse. Seega võib selles piirkonnas olla ka mere- ja lennuliiklusele ohtlik ilmastik.

02-Jun-2009 – Airbus 330-200, Air France flight 447, Rio de Janeiro – Paris

216 passengers, 12 the crew

the world's worst aviation disaster since 2001 (11-Sep-2001, 4 Boeings)

Järgmised vaikusevööndid on laiustel ca **30°**, kus õhk laskub, ilm on püsivalt **selge ja kuiv**, õhurõhk kõrge, pinnatuuled nõrgad. Purjelaevade ajast pärineb kurva tähendusega nimetus *hobulaiused* (*horse latitudes*). Seiskunud laevadelt oldi sunnitud üle parda heitma nõrkenud loomi vee- ja toiduvarude säästmiseks.

7.5. Cromwelli ekvatoriaalne vastuhoovus

Vaikse ookeani veealune vastuhoovus, suunatud **läänest itta**. Sarnaneb **6000 km** pika ja **400 km** laia veealuse jõega, mis voolab ekvatoriaalalal **100 m** sügavuses. **Kompenseerib ookeani pinnal idast läände voolavat passaathoovust**. Lõuna-Ameerika rannikuni jõudes põhjustab külma, hapniku- ja toitaineterikka vee pinnale tõusmist (*upwelling*), soodsat keskkonda kaladele Peruu ja Tšiili rannikul, stabiilset ilmastikku.

Avastas 1952. aastal Honolulu (Hawaii) Laboratooriumi teadur **Townsent Cromwell**.

the Cromwell current – 1962. aastal märgiti Guinnessi rekordite raamatusse

Ekvatoriaalsed vastuhoovused on avastatud ka Atlandi ja India ookeanides, kuid vähetuntud.

7.6. El Niño

Aegajalt, mõneaastase vahega, toimub hilissügisel Vaikse ookeani hoovustes ulatuslik kõrvalekalle tavapärasest õhu ja vee liikumismustrist ning **külm vesi ei kerki enam Peruu ja Tšiili rannikule**. Selle asemel jääb endise *upwellingu* piirkonda soe vesi, hapniku- ja toitainevaene, kalaparveded lahkuvad. Kõrbelistel kaldaaladel hakkab sadama, mis tavaliselt on oodatud ilmastikunähtus, kuid vihm kasvab üle katastroofiliseks valinguks, põhjustades üleujutusi ja maalihkeid. Kuna nimetatud ilmastikunähtus leiab harilikult aset detsembris, kasutatakse religioosset-katoliiklikku nimetust *El Niño*:

niño, hisp k – väike poiss,

El Niño, hisp k – jõululapsuke.

Eriti mõjustab *El Niño* Tšiili pikal rannajoonel paiknevat kalatööstust, mis on riigi juhtivaid majandusharusid. Kalaparvede lahkumise tõttu on toiduraskustes ja hääbuvad Andides pesitsevad merelindude tohutud kolooniad. Langeb teise tähtsa majandusharu, linnusõnnikku (guaano) kogumine ja pakendamine.

El Niño kestab mitu kuud, kuni pool aastat, isegi aasta. Selgus, et tegemist on globaalse ilmastikunähtusega, mille mõju ulatub parasvöötmeni ning milles Peruu ja Tšiili rannikul toimuv on ainult üks osa. Kogu atmosfääri ja ookeani nähtuste kompleksi, millest *El Niño* on üks kesksemaid, kutsutakse lõunavõnkumiseks; *ENSO*:

ENSO = El Niño South Oscillation.

The Southern Oscillation is the **atmospheric component** of El Niño. This component is an oscillation in surface air pressure between the tropical eastern and the western Pacific Ocean waters. The strength of the Southern Oscillation is measured by the Southern Oscillation Index (SOI). The SOI is computed from fluctuations in the surface air pressure difference between **Tahiti** (French Polynesia, **ca 15°S, 150°W**) and **Darwin** (Australia). El Niño episodes are associated with negative values of the SOI, meaning there is below normal pressure over Tahiti and above normal pressure of Darwin. *Wiki#Definition*

Keskmisest (neutraalsest) veetemperatuurist madalama temperatuuriga olukorda ehk *El Niño* vastasfaasi, kutsutakse *La Niña*:

niña, hisp k – väike tüdruk,

La Niña – vastasnähtus *El Niño*-le; väga soodsad ilmastiku- ja kalapüügiolud

Viimased ENSO uudised (12. märts 2020)

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/

EL NIÑO/SOUTHERN OSCILLATION (ENSO) DIAGNOSTIC DISCUSSION

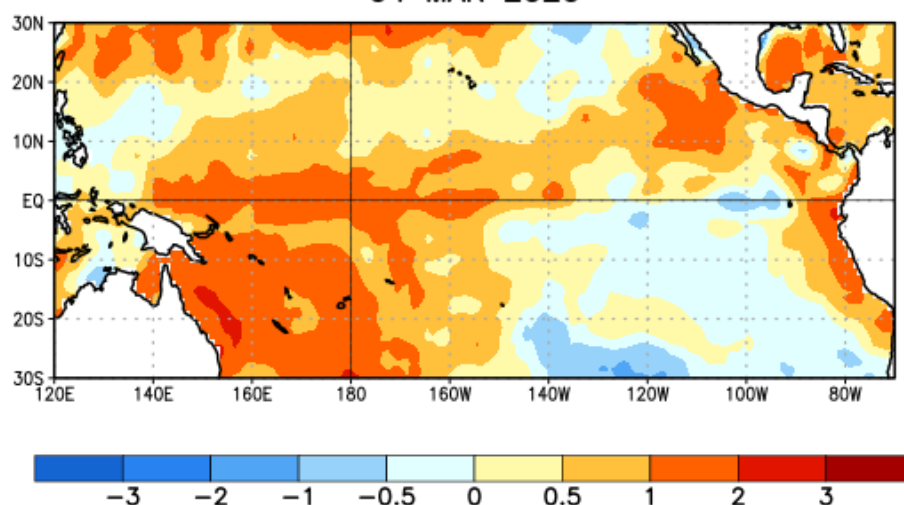
issued by

CLIMATE PREDICTION CENTER/NCEP/NWS

and the International Research Institute for Climate and Society

SST Anomalies (°C)

04 MAR 2020



Joon. 3. Average sea surface temperature (SST) anomalies (°C) for the week centered on 4 March 2020. Anomalies are computed with respect to the 1981-2010 base period weekly means. Joonise mõistmiseks leidke: Panama kanal, Uus-Guinea saar, Austraalia, Darwini linn, Tahiti saar.

Synopsis: ENSO-neutral is favored for the Northern Hemisphere spring 2020 (~65% chance), continuing through summer 2020 (~55% chance). ENSO Alert System Status: Not Active

Climate Prediction Center, National Centers for Environmental Prediction, NOAA/National Weather Service
College Park, MD 20740

In summary, ENSO-neutral is favored for the Northern Hemisphere spring 2020 (~65% chance), continuing through summer 2020 (~55% chance; click CPC/IRI consensus forecast for the chance of each outcome for each 3-month period).

7.7. Ekmani hoovus

Ekmani hoovuseks nimetatakse puhast triivhoovust avaookeanis, st sellist vee suuremas-
taabilist liikumist, mis tekib ainult tuule mõjul ja mille korral veepind jääb horisontaalseks.

Ilmselt kujutab Ekmani hoovus endast idealiseeritud liikumist. Reaalselt tekib Ekmani
hoovusele lähedane liikumine siis, kui piisavalt suurel avaookeani territooriumil (ulatus
sadades kilomeetrites, et vee kuhjumine oleks minimaalne) puhub ühtlane tuul ja ookeani
sügavus on vähemalt mitusada meetrit.

Ekmani hoovuse mõistmiseks jaotatakse ookean mõtteliselt õhukesteks veekihtideks.

Saab tõestada (seda tehakse *merefüüsika* või *meredünaamika* kursuses), et kui:

- horisontaalse veepinna liikumist põhjustab ainult tuul,
- tiheduse erinevusest tingitud liikumisi vees ei ole,
- meri on sügav (vähemalt mõnisada meetrit),

siis liigub kõige pindmine veekiht **45°** paremale sellest suunast, kuhu puhub tuul (kõrvale-
kalde põhjuseks on Coriolise jõud).

Pindmine veekiht tõmbab sisehõörde tõttu liikuma vahetult tema all oleva veekihi. Hõõrdu-
mise tõttu on selle kihi kiirus pisut väiksem pinnakihi kiirusest. Kiiruse suund on aga pisut
paremale suunatud võrreldes pinnakihi liikumissuunaga (ka selle kõrvalekalde põhjuseks on
Coriolise jõud).

Nii tõmbab iga veekiht endaga kaasa tema all oleva veekihi. Iga järgmise kihi kiirus on vee
sisehõörde tõttu väiksem eelmise omast ja kiirus pisut paremale suunatud. Sügavusel
mõnikümmend meetrit on vee liikumissuund **vastupidine** pinnakihi liikumissuunale. Kuid
kiirus on ca **23** korda väiksem pinnakihi kiirusest (täpsemalt: $e^\pi \approx 23.14$).

Veel mõnikümmend meetrit sügavamale – ja kiirusvektor on pöördunud täiendavad **180°**,
olles pinnakihi kiirusvektoriga jälle **samasuunaline**. Kiiruse enda väärtus on kahanenud
veel **23** korda, võrreldes pinnakihi kiirusega on kiirus vähenenud ca **23·23 = 529** korda
(täpsemalt: $e^{-\pi} \approx 0.00187 \approx 1/535$).

Ekmani kihi paksus on ca **100 m**. Sellest sügavamal paikneb hoopis paksem, nn **geostroofi-
line kiht**, milles keeriseid praktiliselt pole, seetõttu võib sisehõörde lugeda tühiseks ja kus
liikumist modelleerides võib jätta hõõrdumise arvestamata.

Ekman V.W.

Ekman, Vagn Walfried (3.V 1874 – 9.III 1954), rootsi füüsik-teoreetik ja okeanograaf.

Tema isa, keemiaprofessor F.L. Ekman (1830–1890), oli rootsi merekeemia ja merefüüsika
pioneeriks.

Õppis Uppsala (1893–1896) ja Stockholmi (1896–1901) Ülikoolis. Aastatel 1902–1909 töö-
tas ta Oslos rahvusvahelises mereuurimislaboris, oli kuulsa norra meteoroloogi **Vilhelm
Bjerknesi** (1862–1951) juhendatavaks.

Lundi Ülikooli mehhaanika ja matemaatilise füüsika professor (1910–1939). Rootsi
Kuningliku TA liige.

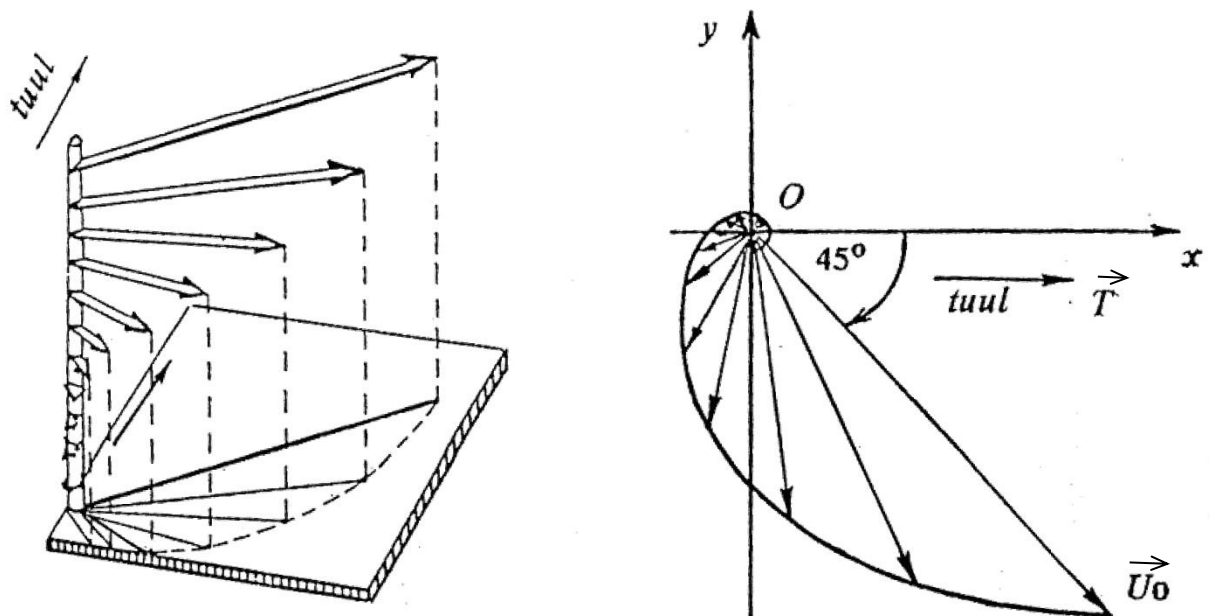
V.W. Ekman uuris nii laboriekspperimentidega kui teoreetiliselt Maailmameres toimuvaid hüdrodünaamilisi nähtusi. Tema mitme uurimuse (surnud vesi, vee liikumissuuna erinevus tuule omast) idee pärines norra polaaruurija ja ühiskonnategelase prof **Fridtjof Nanseni (1861–1930)** pöördumistest füüsikute poole.

V.W. Ekmani tuntuimaks saavutuseks on vee kiirusvektori ümber sügavustelje keerdumise avastamine (**1905, nn Ekmani spiraal, Ekmani kiht**). Nimetatud tulemused on rakendatavad ka aluspinnalähedases õhukihis toimuvate liikumiste kirjeldamiseks.

Kuigi atmosfääri jaoks lahendas analoogse ülesande esimesena Uppsalas töötanud rootsi meteoroloog **Filip Åkerblom (1909)**, kasutatakse ka atmosfäärifüüsikas terminit *Ekmani spiraal*. Atmosfääris pöörduv tuul kõrgusega paremale.

Ekmani spiraal, kiiruste hodograaf

Joonisel 4 on esitatud Ekmani spiraal ja vee voolukiiruste hodograaf põhjapoolkera jaoks.

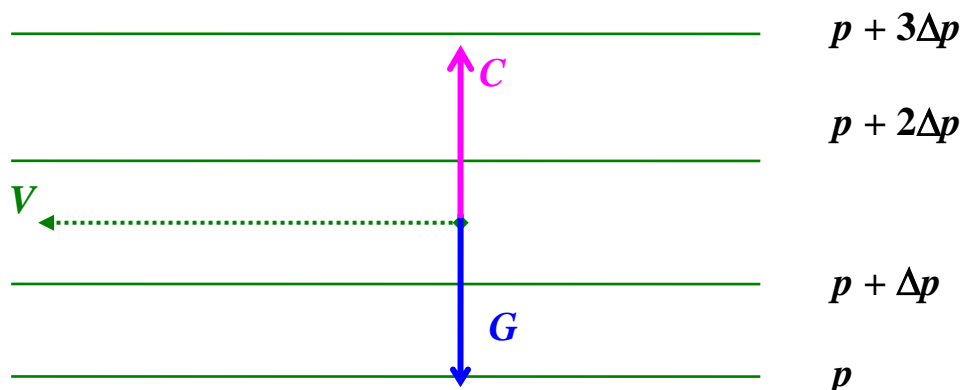


Joon. 4. Ekmani **spiraal** ja **kiiruste hodograaf** Ekmani merehoovuses põhjapoolkeral. Tuul põhjustab veepinnal puutujasuunalise pinge (jõu pinnaühiku kohta) \vec{T} , vee pinnakiht liigub sellest 45° paremale, kiirusega \vec{U}_0 . Iga allpool asuv veekiht liigub pisut paremale tema kohal asuvast veekihist ning on sisehõõrde tõttu aeglasem. Horisontaalsele merepõhjale projekteeritud kiirusvektorite otspunktide mähisjoon, kiiruste hodograaf, kujutab endast kokkukeerduvat spiraali.

7.8. Geostroofiline tuul (geostroofiline voolamine)

Kujutleme isobaare (samarõhujooned) maakaardil, kus põhja ilmakaare pool asub kõrgema rõhuga ala, õhurõhk langeb lõunapoolse liikudes. Igal järgmisel lõunapoolsemal isobaaril olgu rõhk Δp võrra väiksem.

Vaatleme kiirusega V liikuvale õhuosakesele mõjuvaid jõudusid (joon. 5).



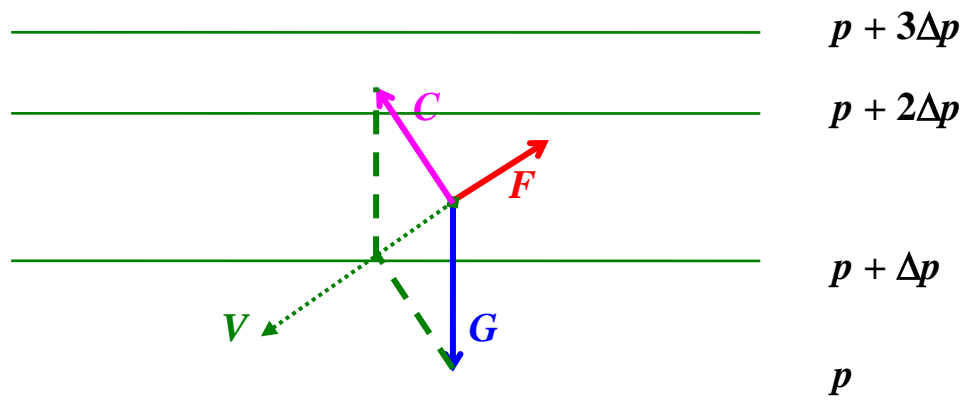
Joon. 5. Hõõrdejõu puudumisel on õhuosakese kiirus paralleelne isobaaridega;
 V – tuule kiirus, C – Coriolise jõud, G – gradientjõud.

Hõõrdumise puudumisel (piisavalt kõrgel aluspinnast, kus tõusvate õhuvoolude puudumise tõttu pole keeriseid), tasakaalustavad gradientjõud ja Coriolise jõud teineteist, $G = C$.

Tuult hõõrdevabas atmosfääris (**sirged isobaarid**) nimetatakse *geostroofiliseks tuuleks*.

Geostroofiline tuul puhub paralleelselt isobaaridega, põhjapoolkeral jääb **madalama rõhuga ala vasakule**.

Hõõrdejõu (F , friktsioonjõud, suund vastupidine kiirusele) lisamine lühendab kiirusvektorit ja vähendab seega ka Coriolise jõudu, kuid Coriolise jõud on suunatud ikka kiirusvektorist 90° paremale. Tasakaal kujuneb nüüd välja kolme jõu (G , F , C) koosmõjul, Coriolise jõud ei ole enam suunatud vastupidises suunas gradientjõule (joon. 6).



Joon. 6. Hõõrdejõu F olemasolul väheneb kiirus V , sellega seoses väheneb ka Coriolise jõud C ; jõudude tasakaalu kujunemiseks ei saa õhuosakese kiirus enam olla paralleelne isobaaridega.

7.9. Tuul tsüklonis ja antitsüklonis

Ranges käsitluses kasutatakse terminit *geostroofililne tuul* vaid **sirgete isobaaride korral**. Kõverjoonsete isobaaride korral tuleb arvestada veel õhuosakesele mõjuvat tsentrifugaaljõudu. Vaatame **hõõrdevaba** liikumist ringjoonekujuliste isobaaride korral, atmosfääris kannab selline liikumine nime *gradienttuul* ehk *tsüklostroofilne tuul* (termini gradienttuul kasutamises puudub üksmeel).

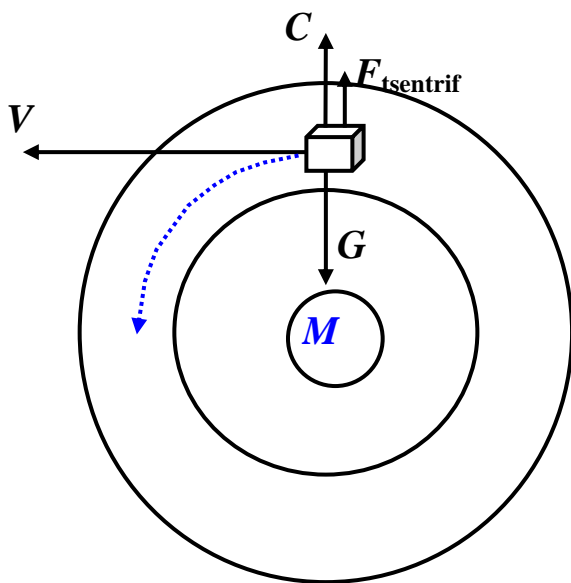
Tuul tsüklonis

Vaatame kuubikujulist (näiteks 1 m^3) õhuosakest tsüklonis. Tsentri poole suunatud jõuks on gradientjõud G , mis hoiabki alal kõverjoonelise liikumise vastu kellaosutit (joon. 6).

Kuigi õhuosakesele mõjuv rõhu gradientjõud on nüüd tasakaalustatud mitte ainult Coriolise jõuga, vaid ka tsentrifugaaljõuga:

$$G = C + F_{\text{tsentrif}}, \quad (1)$$

ei järeldu sellest võrrandist mingeid teoreetilisi piiranguid madalrõhkkonna gradienttuule kiiruse kohta. Gradientjõud võib olla väga suur ning põhjustada katastroofiliselt suuri tuule kiirusi – orkaane. Hõõrdumise puudumisel toimub liikumine piki isobaare.



Joon. 7. Gradienttuul põhjapoolkera tsüklonis, M tähistab madalaima rõhuga ala.

Hõõrdejõu lisamisel väheneb õhuosakese kiirus ja vähenevad nii Coriolise kui tsentrifugaaljõud jõud, gradientjõud aga jääb endiseks, võrrand (1) asendub võrratusega:

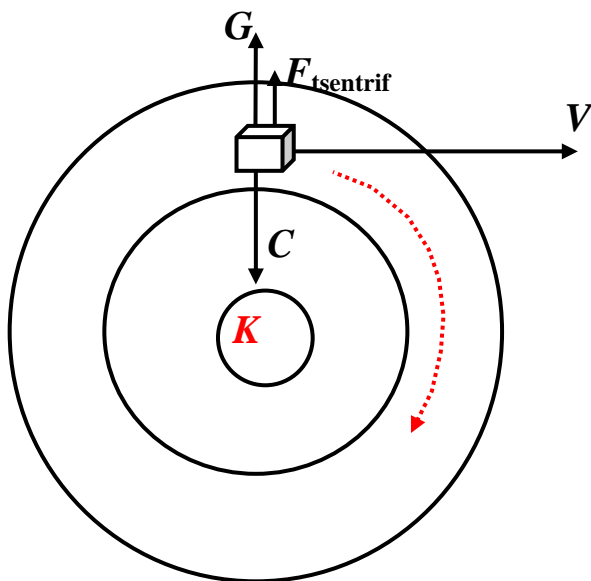
$$G > C + F_{\text{tsentrif}} \quad (2)$$

ning iga tiiruga nihkub õhuosake ka sentri poole. Trajektoor muutub kinnikeerduvaks spiraaliks. Üha rohkem õhku satub kõige madalama rõhuga alale – madalrõhkkond täitub aeglaselt.

Teisiti on olukord antitsüklonis.

Tuul antitsüklonis

Antitsükloni keskel on kõrgema rõhuga ala, **K** (joon. 8).



Joon. 8. Gradienttuul põhjapoolkera antitsüklonis, **K** märgib kõrgemat rõhku.

Päri kellaosutit toimuvat kõverjoonelist liikumist hoiab nüüd alal (on suunatud tsentri poole) Coriolise jõud, jõudude tasakaalu võrrand hõõrdejõu puudumisel:

$$C = G + F_{\text{tsentrif}} . \quad (3)$$

Hõõrdejõu lisamisel väheneb jällegi õhuosakese kiirus ja Coriolise jõud väheneb, gradientjõud aga jääb endiseks. Mõnevõrra stabiliseerib olukorda tsentrifugaaljõu vähenemine. Kuid hõõrdumise korral asendub võrdus (3) võrratusega:

$$C < G + F_{\text{tsentrif}} \quad (4)$$

ning õhuosake hakkab nihkub tsentrist eemale. Trajektoor muutub lahtikeerduvaks spiraaliks. Kõrgrõhkkond hajub.

Kuid võrratus (4) võib tekkida ka hõõrdumise puudumisel. Ja nimelt, Coriolise jõud kasvab võrdeliselt õhuosakese kiirusega, kuid tsentrifugaaljõud võrdeliselt kiiruse ruuduga. Alates teatud kiirusest ei suuda Coriolise jõud tasakaalustada talle vastutöötavat kahte jõudu, ning trajektoor muutub lahtikeerduvaks. Seega on kõrgrõhkkonnas gradientjõud, vastavalt ka tuule kiirused, piiratud. Ei ole mõeldav kõrgrõhkkond väga tugevate tuultega.

7.10. Jugavoolud

The jet stream is a strong flowing ribbon of air that flows around our planet high up in the atmosphere, at around the level of the tropopause. Situated between the troposphere and the stratosphere, the Jet Stream is approximately **11 kilometres above the surface** of the Earth at the poles and around **17 kilometres** above the surface of the Earth at the equator. The jet stream flows at around 160 km ph (100 mph). We often hear that the jet stream is responsible for influencing the weather in the UK, so it is natural to wonder what causes the jet stream and why it has such an influence on the weather we experience on the ground.

Jet streams form and are strongest where variable air temperature gradients are steepest. This is normally seen in **two zones**:

- The boundary between the polar and mid latitude air . The Polar Front Jet or Polar jet
- The boundary between the mid latitude air and tropical air . The Subtropical Jet.

Netweather.tv is one of the leading independent weather forecasting companies in the UK.

<http://www.netweather.tv/>

Jugavoolud kujutavad endast tropopausis esinevaid väga tugevaid, horisontaalseid, globaalse ulatusega tuulejugasid (lamedaid tuuletorusid).

jet streams, струйные течения



Joon. 9. USA piloot **Wiley Post** (1898–1935) lenduriskafandris.

W. Post aitas kaasa lenduriskafandri loomisele. Lendas esimesena üksi ümber maakera (1933, siiski vahemaandumistega puhkamiseks ja lennukiremondiks Saksamaal, Venemaal jm). Skafandri katsetamise kõrglendudel märkas ta korduvalt, et lennuki kiirus maapinna suhtes ületab oluliselt lennuki kiirust õhu suhtes, järelikult pidi ta olema sattunud väga kiirsesse õhuvoolu.

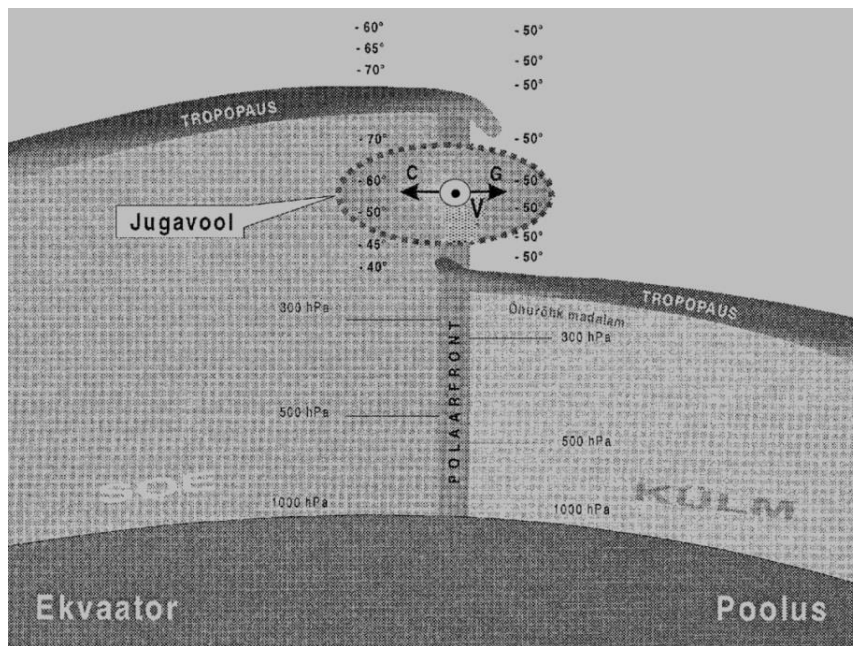
Jugavoolude süsteemsem uurimine ja kasutamine toimus II Maailmasõja lõpul Vaikse ookeani kohal Jaapanit pommitama lendavate USA pilootide poolt, kes mõnikord märkasid sattumist tugevasse, kiirusega kuni **300 km/h** õhuvoolu. Kuna jugavoolude horisontaalne ulatus küündib **10 000 kilomeetrit**, võimaldas nende sobiv kasutamine lühendada oluliselt lennuaega, pikendada lennukaugust, hoida kokku kütust. Tänapäeval valmistatakse lennunduse tarbeks iga **6 h** järel jugavoolude kaarte.

Jugavoolude kirjeldus. Peale horisontaalse ulatuse on ka jugavoolude ristlõige märkimisväärne – vertikaalis (võimsus) **2–4 km**, harva isegi **6–7 km**. Jugavoolu laius on **300–400 km**, kuid võib kitseneda ka kuni **40 km**. Tuule kiirus jugavoolus on tavaliselt **200–300 km/h**, kuid pole ka haruldased kiirused **500 km/h**. Maksimaalsete jugavoolu kiirustena mainitakse **700 km/h**.

Nii põhja- kui lõunapoolkeral on **kaks** enam-vähem püsivat (*semipermanent*) jugavoolu:

- 1) **polaarfrondi jugavool** – pooluse ümber oleva külma polaarse õhu ja sellest lõunapool asuva soojema parasvöötme õhu piiril;
- 2) **subtroopiline jugavool** – troopilise õhu ja jahedama parasvöötme õhu piiril.

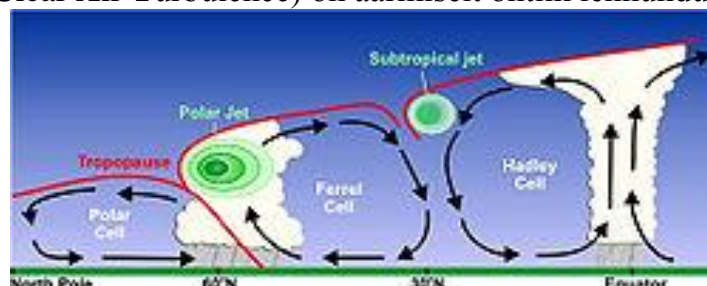
Vastavalt külmema ja soojema õhu piiri sesoonse nihkumisega nihkuvad ka jugavoolud talvel poolusest eemale, lähemale ekvaatorile, ja suvel pooluste suunas, kaugemale ekvaatorist. Vaatame põhjapoolkera polaarfrondi jugavoolu tekkimist (joon. 10).



Joon. 10. Polaarfrondi jugavoolu skeem põhjapoolkeral. Ekvaatorile lähemas soojemas õhus on samal kõrgusel aluspinnast õhurõhk kõrgem. Õhurõhu gradientjõud G lükkab õhuosakest (*parcel*) pooluse poole. Õhk ei liigu siiski pooluse suunas, sest Coriolise jõud C kallutab liikumist paremale. Analoogselt geostroofilise tuulega kujuneb olukord, kus õhk liigub paralleelselt isobaaridega, antud joonisel on õhuosakese kiirusvektor V suunatud joonisest ristsuunas välja, joonise vaataja poole. Mõlemal poolkeral liigub õhk ida ilmakaare suunas. Jugavoolu piirkonnas toimub tropopausi kõrguse järsk vähenemine üleminekul külmemasse õhku.

(Rekonstruktsioon M. Jürissaare õpiku (1998) nr 83 joonisest, lk 149.)

Analoogselt **polaarfrondi jugavoolule** kujuneb põhjapoolkera teine, **subtroopiline jugavool**, milles õhk samuti liigub ida ilmakaare suunas (joon. 11), kuid mille all, langevate kuivade õhuvoolude tõttu, on taevast pilvitu. Pilvede puudumine teeb raskeks subtroopilise jugavoolu ja sellega kaasneva turbulentsi visuaalse avastamise. Vastav nähtus, selge õhu turbulents (**CAT** – Clear Air Turbulence) on äärmiselt ohtlik lennundusele.



Joon. 11. Põhjapoolkera jugavoolud, polaarne ja subtroopiline. Mõlema jugavoolu voolusuund on joonise sisse (vaatajast eemale), ida suunas. Subtroopilise jugavoolu piirkonnas ohustab lennundust selge õhu turbulents, CAT.

(http://en.wikipedia.org/wiki/Jet_stream)

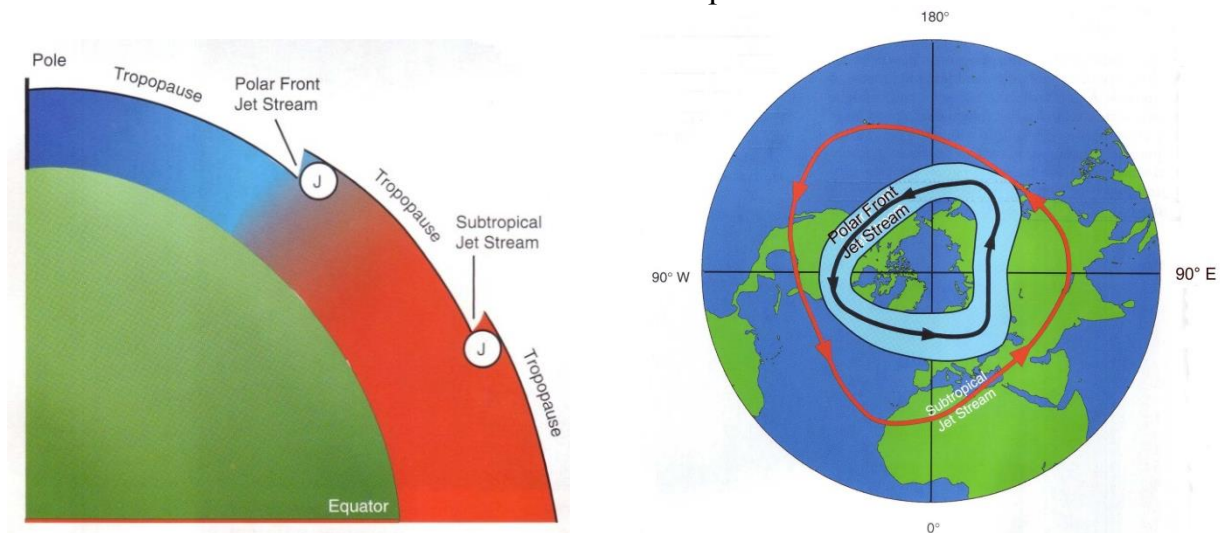
Kokku on planeedil **neli püsivat jugavoolu tsooni** (joon. 12), milles **kõikides liigub õhk ida suunas**. Ajutiselt võib külmade ja soojade õhumasside piiril kujuneda täiendavaid lokaalseid jugavoole.



Joon. 12. Nii põhja- kui lõunapoolkeral on kaks jugavoolu, neis kõigis liigub õhk ida suunas. (http://en.wikipedia.org/wiki/Jet_stream)

Jugavoolude geograafiline asukoht on sesoonselt muutuv. **Polaarne jugavool** on tugevam ja nihkub talvel lõuna poole koos kogu polaarse õhumassi talvise tugevnemisega. Suvel polaarse õhu piir taganeb pooluse suunas, polaarne õhumass tõmbub kokku, tema mõju atmosfääri tsirkulatsioonile nõrgeneb. Vastavalt paikneb polaarfrondi jugavool suvel poolusele lähemal ja on nõrgem.

Ka subtroopiline jugavool on tugevam ja ekvaatorile lähemal talvel, kuid subtroopilise jugavoolu sesoonsed muutused on oluliselt väiksemad kui polaarfrondi omal.



Joon. 13. Põhjapoolkera jugavoolud. Joonise vasakpoolsest osast ilmneb tropopausi kaheastmeline laskumine liikudes ekvaatorilt pooluse suunas. Nii subtroopiline kui polaarfrondi jugavool, “Jet, J” on suunatud joonise sisse. Joonise parempoolses osas hõlmab polaarfrondi jugavool laiema ala, mis vastab asukoha suuremale sesoonsele varieeruvusele.

(Peter F. Lester (2004), Aviation weather. *Jeppesen, Sanderson Training Products*, 7–12.)

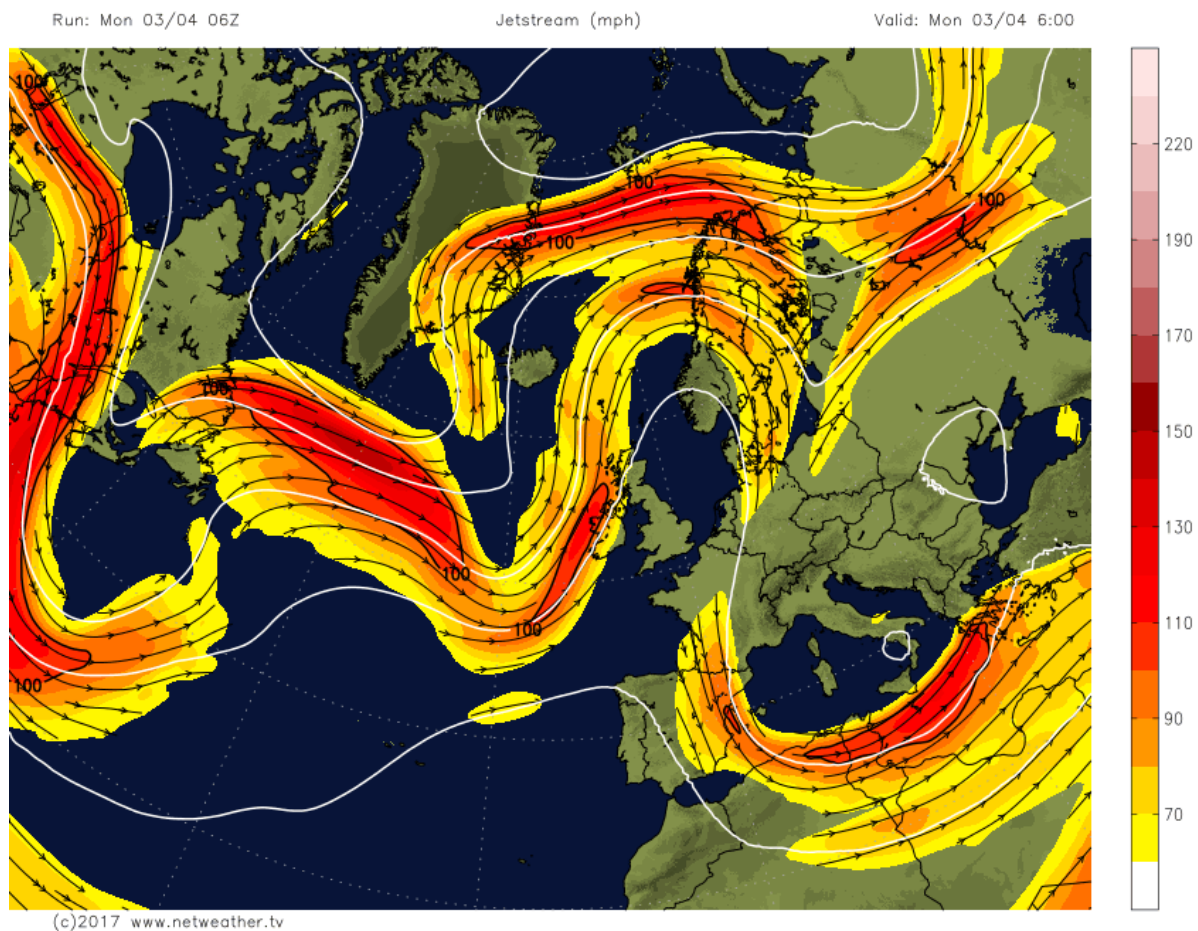
Subtroopiline jugavool on geograafilise asukoha poolest **stabiilsem** ja muutub sesoonselt vähem. **Polaarse jugavoolu muutlikkus** on märgatavalt suurem, vastavalt on joonise 13 parempoolses osas, kus joonise keskel on põhjapoolus, polaarne jugavool joonistatud katma laiemat ala.

Joonise 13 vasakul poolel, maakera meridionaalsel ristlõikel, on selgesti välja toodud tropopausi kaheastmeline madaldumine liikudes piki meridiaani ekvaatorilt pooluse suunas. Mõlemad ristlõike jugavoolud, **J**, on suunatud joonise sisse, mis vastab liikumisele ida suunas. Talvised jugavoolud (polaarne ja subtroopiline) paiknevad vastavalt laiuskraadide **30° ja 60°** piirkonnas, suvel nihkuvad jugavoolud pooluse suunas.

Lõunapoolkera jugavoolude skeemid on analoogsed, õhk liigub ikka ida suunas.

Näide jugavoolude kaardist 03. apr 2017 (joon. 14), mis on küll Briti saarte keskne. Aadressilt <http://www.netweather.tv/index.cgi?action=jetstream;sess=> võib seda kaarti vaadelda ka animatsioonis. Uuendatakse 4 korda ööpäevas.

Küsimus: Mida tähendab kaardi ülaservas lühend 06Z ??



Joon. 14. Jugavoolude kaart, 03. apr 2017.